

(19)日本国特許庁 (J P)

(12)公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平 1 1 - 7 2 8 1 0

(43)公開日 平成 1 1 年 (1 9 9 9) 3 月 1 6 日

(51)Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G02F 1/37			G02F 1/37	
G02B 6/122			G02B 6/12	A
6/12				H

審査請求 未請求 請求項の数 2 3 O L (全 1 8 頁)

(21)出願番号 特願平 1 0 - 1 4 8 7 2 9

(22)出願日 平成 1 0 年 (1 9 9 8) 5 月 2 9 日

(31)優先権主張番号 特願平 9 - 1 6 2 2 5 6

(32)優先日 平 9 (1 9 9 7) 6 月 1 9 日

(33)優先権主張国 日本 (J P)

(71)出願人 0 0 0 0 0 5 8 2 1
松下電器産業株式会社
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地

(72)発明者 水内 公典
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下
電器産業株式会社内

(72)発明者 山本 和久
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下
電器産業株式会社内

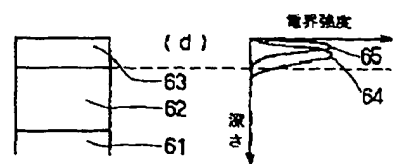
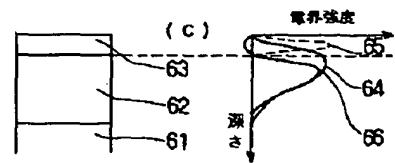
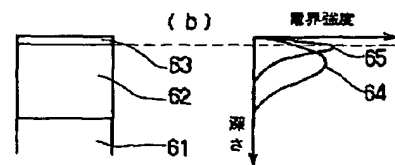
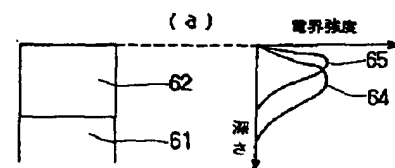
(74)代理人 弁理士 池内 寛幸 (外 1 名)

(54)【発明の名称】 光導波路とその製造方法、この光導波路を用いた光波長変換素子、短波長光発生装置および光ピックアップ

(57)【要約】

【課題】 優れた集光特性を有する第 2 高調波出力が可能で、かつ基本波と第 2 高調波とのオーバーラップを大きくした光波長変換素子を提供する。

【解決手段】 結晶基板 6 1 の表面に形成された導波路 6 2 の表面に、この導波路 6 2 よりも屈折率が高いイオン交換層 6 3 を形成する。このイオン交換層 6 3 の厚さを、基本波 6 4 はイオン交換層内を伝播できないが高調波 6 5 はイオン交換層内を伝播しうる厚さとする。導波路内において、基本波 6 4 と高次モードの高調波 6 6 とを位相結合させる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 結晶基板と、前記結晶基板の表面に形成された導波路と、前記導波路の表面に形成されたイオン交換層とを含み、

前記イオン交換層が、前記導波路の屈折率よりも大きい屈折率と、前記導波路を伝播する基本波は前記イオン交換層内を伝播できないが前記基本波の高調波は前記イオン交換層内を伝播しうる厚さとを備えていることを特徴とする光導波路。

【請求項 2】 前記イオン交換層の厚さが、前記高調波の回折限界以下である請求項 1 に記載の光導波路。

【請求項 3】 前記イオン交換層の幅が、前記導波路の幅よりも狭い請求項 1 に記載の光導波路。

【請求項 4】 基本モードの前記基本波と高次モードの前記高調波とが前記導波路内において位相結合しうる請求項 1 に記載の光導波路。

【請求項 5】 前記イオン交換層の屈折率が、前記導波路の屈折率の 1. 0 1 倍よりも大きい請求項 1 に記載の光導波路。

【請求項 6】 前記導波路がイオン交換により形成された層であり、前記導波路のイオン交換率が前記イオン交換層のイオン交換率の 5 0 % 以下である請求項 1 に記載の光導波路。

【請求項 7】 前記結晶基板において、結晶の分極方向と前記表面とが 0. 5 ° ~ 5 ° の角度をなす請求項 1 に記載の光導波路。

【請求項 8】 前記導波路の端部において、前記高屈折率層の幅がテーパ状に狭められている請求項 1 に記載の光導波路。

【請求項 9】 前記結晶基板が非線形光学効果を有する請求項 1 に記載の光導波路。

【請求項 1 0】 結晶基板と、前記結晶基板の表面に形成された導波路と、前記導波路の表面に形成され、前記導波路よりも屈折率が高い高屈折率層とを含み、前記高屈折率層が、前記導波路を伝播する基本波は前記高屈折率層内を伝播できないが前記基本波の高調波は前記高屈折率層内を伝播しうる厚さを備えていることを特徴とする光導波路。

【請求項 1 1】 結晶基板と、前記結晶基板の表面に形成された導波路と、前記導波路の表面に形成されたイオン交換層とを含み、前記イオン交換層が、前記導波路の屈折率よりも大きい屈折率と、前記導波路の幅よりも狭い幅と、前記導波路の深さの半分以下の深さとを備えていることを特徴とする光導波路。

【請求項 1 2】 結晶基板の表面に線条の非マスク部分が確保されるように耐イオン交換マスクを形成する工程と、前記表面の非マスク部分を通じてイオン交換することにより前記結晶基板内に第 1 のイオン交換部を形成する工程と、前記基板を熱処理することにより前記第 1 の

イオン交換部を拡張して導波路とする工程と、前記非マスク部分を通じてイオン交換することにより前記導波路内に前記導波路よりも屈折率が高い第 2 のイオン交換部を形成することを特徴とする光導波路の製造方法。

【請求項 1 3】 請求項 1 ~ 1 1 のいずれかに記載の光導波路を含み、さらに前記導波路を周期的に横断するように形成された 2 以上の分極反転部を含むことを特徴とする光波長変換素子。

【請求項 1 4】 非線形光学効果を有する結晶と、前記結晶の表面に形成された導波路と、前記導波路を周期的に横断するように形成された 2 以上の分極反転部と、前記導波路の表面に形成されたイオン交換層とを含み、前記イオン交換層が、前記導波路の屈折率よりも大きい屈折率と、前記導波路を伝播する基本波は前記イオン交換層を伝播できないが前記基本波の高調波は伝播しうる厚さとを備えていることを特徴とする光波長変換素子。

【請求項 1 5】 非線形光学効果を有する結晶と、前記結晶の表面に形成された導波路と、前記導波路を周期的に横断するように形成された 2 以上の分極反転部と、前記導波路の表面に形成されたイオン交換層とを含み、前記イオン交換層が、前記導波路の屈折率よりも大きい屈折率と、前記導波路の幅よりも狭い幅と、前記導波路の深さの半分以下の深さとを備えていることを特徴とする光波長変換素子。

【請求項 1 6】 前記分極反転部が、前記導波路には形成されているが前記イオン交換層には形成されていない請求項 1 4 または 1 5 に記載の光波長変換素子。

【請求項 1 7】 前記イオン交換層の深さが、前記導波路の幅中央における前記結晶の表面から前記分極反転部の上端までの深さよりも深い請求項 1 4 または 1 5 に記載の光波長変換素子。

【請求項 1 8】 非線形光学効果を有する結晶と、前記結晶の表面に形成された導波路と、前記導波路を周期的に横断するように形成された 2 以上の分極反転部と、前記導波路の表面に形成され、前記導波路よりも屈折率が高い高屈折率層とを含み、

前記高屈折率層が、前記導波路を伝播する基本波は前記高屈折率層内を伝播できないが前記基本波の高調波は前記高屈折率層内を伝播しうる厚さとを備えていることを特徴とする光波長変換素子。

【請求項 1 9】 前記分極反転部が、前記導波路には形成されているが前記高屈折率層には形成されていない請求項 1 8 に記載の光波長変換素子。

【請求項 2 0】 請求項 1 3 ~ 1 9 のいずれかに記載の光波長変換素子と半導体レーザとを含み、前記半導体レーザから出射された光を前記光波長変換素子により波長変換することを特徴とする光発生装置。

【請求項 2 1】 0. 8 λ 以下のサブピークを含む高次モードの高調波へと波長変換する請求項 2 0 に記載の光発生装置。ただし、 λ は前記高調波の波長である。

3

【請求項 2 2】 波長変換された高調波を集光する集光光学系を含み、前記集光光学系の開口数 NA と、前記イオン交換層または前記高屈折率層の厚さ LD とが、下記関係式を満たす請求項 2 0 に記載の光発生装置。

$$LD < 0.8 \lambda / NA$$

ただし、 λ は前記高調波の波長である。

【請求項 2 3】 請求項 2 0 に記載の光発生装置と集光光学系と記録メディアとを含む光ピックアップであって、前記光発生装置から出射された光を前記集光光学系により前記記録メディア上に集光することを特徴とする光ピックアップ。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

【発明の属する技術分野】本発明は、コヒーレント光源を応用した、光情報処理、光応用計測の分野に使用される光導波路および波長変換素子に関するものである。また、本発明は、このような光波長変換素子を用いた光発生装置および光ピックアップに関するものである。

【 0 0 0 2 】

【従来の技術】光導波路は、光波制御のために通信、光情報処理、計測等広い分野で利用されている。特に光導波路の光波長変換素子への適用は、半導体レーザの波長変換による小型の短波長光源を実現するために盛んに研究が行われている。

【 0 0 0 3 】例えば、特開平 5 - 2 7 3 6 2 4 号公報には、図 2 0 に示すように、光導波路の表面近傍に非線形劣化層を設けて、高効率化、安定化を図った光波長変換素子が開示されている。図 2 0 において、2 0 1 は LiTaO_3 基板、2 0 2 は導波層、2 0 3 は分極反転層、2 0 4 は非線形劣化層である。光波長変換素子の導波層 2 0 2 内に入射された TM 0 0 モードの基本波 2 0 5 は、導波層 2 0 2 内で TM 1 0 モードの高調波 2 0 6 に波長変換されている。非線形劣化層 2 0 4 の厚みは約 $0.45 \mu\text{m}$ で、導波層 2 0 2 の厚みは $1.8 \mu\text{m}$ である。TM 1 0 モードの高調波は、図 2 1 に示すように、TM 0 0 モードの基本波とほぼ同程度のピーク出力を有する。即ち、TM 0 0 モードの基本波と TM 1 0 モードの高調波との間でオーバーラップの増大が図られ、高効率化が達成されている。

【 0 0 0 4 】また、例えば特開平 4 - 2 5 4 8 3 4 号公報には、導波層より屈折率の高い高屈折率層を導波層上に形成する構成が報告されている。この光波長変換素子の構成図を図 2 2 に示す。この光波長変換素子は、 LiNbO_3 基板 3 0 1 上に形成されたプロトン交換による光導波層 3 0 2 の表面に、分極反転層 3 0 3 と TiO_2 からなる高屈折率層 3 0 4 とが形成されている。 TiO_2 の屈折率はプロトン交換による導波層 3 0 2 の屈折率よりも大きく、屈折率の高い高屈折率層 3 0 4 を導波層 3 0 2 上に形成することにより、基本波の閉じ込めを強くし、光波長変換素子の高効率化を達成している。

4

【 0 0 0 5 】さらに、特開平 1 - 2 3 8 6 3 1 号公報には、光導波路の閉じ込めを強化するためリッジ型の光導波路構造を採用した光波長変換素子が記載されている。

【 0 0 0 6 】

【発明が解決しようとする課題】上記特開平 5 - 2 3 7 6 2 4 号公報に記載の光波長変換素子には、出射される TM 1 0 モードの光が 2 ピークの強度分布を有し、集光する際に集光特性が劣化するという問題があった。また、この方式では、耐光損傷強度を高めるために高調波を高次モードのピークに分散させているため、出力する高調波が 2 つのほぼ等しい大きさのピークを有している。そのため、高調波出力を集光し、特別な光学系が必要であるため、光学系が複雑化し、小型化が難しいという問題があった。さらに、回折限界まで集光するにはビームをかなり整形する必要があり、出力光の利用効率が 5 0 % 以下に低下するという問題があった。また、非線形劣化層は、基本波の閉じこめを高める機能を有さないため、基本波のパワー密度の増大が図れず、高効率化に限界があった。

【 0 0 0 7 】また、上記特開平 4 - 2 5 4 8 3 4 号公報に記載の光波長変換素子には、高屈折率層として、高屈折率の誘電体膜を使用している点に問題があった。導波層上の高屈折率層は導波層の実効屈折率に与える影響が大きく、導波層全域にわたる膜厚の均一性に高い精度が要求される。例えば、光波長変換素子の場合、導波層全長における位相整合条件は導波層の実効屈折率に厳しく依存するため、導波層の実効屈折率が伝搬方向に渡りわずかに変化すると、変換効率が極端に減少する。このため、高屈折率層の膜厚制御には厳しい均一性が要求されていた。また、基板と異なる材質を導波層の表面に堆積することで、導波層と高屈折率層との界面において導波損失が生じやすいという問題があった。さらに、基板との膨張係数の違いによって、導波層に歪みを与え、導波層の実効屈折率が導波層の伝搬方向に分布を有するという問題が生じていた。

【 0 0 0 8 】さらに、導波層を伝搬する光に対する、高屈折率層の伝搬損失が大きな問題となることが明らかになってきた。光波長変換素子の特性を劣化させる導波層の伝搬損失は、高調波に対するものと、基本波に対するものがある。誘電体の高屈折率層は基本波に対する伝搬損失は比較的小さく問題はないが、高調波は波長が短いため従来の高屈折率膜が与える伝搬損失がかなり大きいことが明らかになった。本発明者らの実験では、各種の高屈折率を有する誘電体膜を試みたが、波長 400 nm 帯の高調波に対してはいずれも -1 dB/cm という大きな伝搬損失が認められ、これにより光波長変換素子の変換効率が $1/2$ 以下に低減されていることがわかった。さらに、高屈折率層は、基本波の閉じこめを高める機能を有さないために基本波のパワー密度の増大が図れず、高効率化に限界があった。

50

【 0 0 0 9 】また、この光波長変換素子は、導波層を伝搬する基本モードの基本波と第 2 高調波におけるオーバーラップの向上を目的としている。このため、基本波と第 2 高調波の屈折率分散の違いより、導波層内での導波モードの分布が大きく異なるため、両モード間でのオーバーラップの増大には制限があり、変換効率を大幅に向上させることは困難であった。さらに、基本波と第 2 高調波がオーバーラップしない部分が大きいため、耐光損傷強度の向上を達成することは困難であった。

【 0 0 1 0 】また、特開平 1 - 2 3 8 6 3 1 号公報に記載の光波長変換素子は、リッジ型光導波路を用いて変換効率の向上が図られている。この場合、光導波路の閉じ込め効果によるパワー密度の増大により変換効率が向上する。しかしながら、基本波は、リッジ導波路による閉じ込め効果の増大は横方向に限られているため、深さ方向の閉じ込めが向上しない。したがって、変換効率への影響が最も大きな基本波と第 2 高調波のオーバーラップの増大（特に深さ方向のオーバーラップの増大）はリッジ構造では達成できず、変換効率の大幅な向上が困難であった。また装荷型光導波路についても、リッジ型と同様に基本波と第 2 高調波とのオーバーラップを大きくできなかった。

【 0 0 1 1 】そこで、本発明は、優れた集光特性を有する第 2 高調波出力が可能で、かつ基本波と第 2 高調波とのオーバーラップを大きくした光波長変換素子を提供することを目的とする。また、この光波長変換素子に用いられる光導波路とその製造方法、さらにはこの光波長変換素子を用いた光発生装置および光ピックアップを提供することを目的とする。

【 0 0 1 2 】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するため、本発明の第 1 の光導波路は、結晶基板と、前記結晶基板の表面に形成された導波路と、前記導波路の表面に形成されたイオン交換層とを含み、前記イオン交換層が、前記導波路の屈折率よりも大きい屈折率と、前記導波路を伝播する基本波は前記イオン交換層内を伝播できないが前記基本波の高調波は前記イオン交換層内を伝播しうる厚さを備えていることを特徴とする。

【 0 0 1 3 】また本発明の第 2 の光導波路は、結晶基板と、前記結晶基板の表面に形成された導波路と、前記導波路の表面に形成され、前記導波路よりも屈折率が高い高屈折率層とを含み、前記高屈折率層が、前記導波路を伝播する基本波は前記高屈折率層内を伝播できないが前記基本波の高調波は前記高屈折率層内を伝播しうる厚さを備えていることを特徴とする。

【 0 0 1 4 】また本発明の第 3 の光導波路は、結晶基板と、前記結晶基板の表面に形成された導波路と、前記導波路の表面に形成されたイオン交換層とを含み、前記イオン交換層が、前記導波路の屈折率よりも大きい屈折率と、前記導波路の幅よりも狭い幅と、前記導波路の深さ

の半分以下の深さとを備えていることを特徴とする。

【 0 0 1 5 】また、本発明の光導波路の製造方法は、結晶基板の表面に線条の非マスク部分が確保されるように耐イオン交換マスクを形成する工程と、前記表面の非マスク部分を通じてイオン交換することにより前記結晶基板内に第 1 のイオン交換部を形成する工程と、前記基板を熱処理することにより前記第 1 のイオン交換部を拡張して導波路とする工程と、前記非マスク部分を通じてイオン交換することにより前記導波路内に前記導波路よりも屈折率が高い第 2 のイオン交換部を形成することを特徴とする。

【 0 0 1 6 】本発明の光波長変換素子は、上記光導波路を含み、さらに前記導波路を周期的に横断するように形成された 2 以上の分極反転部を含むことを特徴とする。

【 0 0 1 7 】具体的には、本発明の第 1 の光波長変換素子は、非線形光学効果を有する結晶と、前記結晶の表面に形成された導波路と、前記導波路を周期的に横断するように形成された 2 以上の分極反転部と、前記導波路の表面に形成されたイオン交換層とを含み、前記イオン交換層が、前記導波路の屈折率よりも大きい屈折率と、前記導波路を伝播する基本波は前記イオン交換層を伝播できないが前記基本波の高調波は伝播しうる厚さを備えていることを特徴とする。

【 0 0 1 8 】また本発明の第 2 の光波長変換素子は、非線形光学効果を有する結晶と、前記結晶の表面に形成された導波路と、前記導波路を周期的に横断するように形成された 2 以上の分極反転部と、前記導波路の表面に形成されたイオン交換層とを含み、前記イオン交換層が、前記導波路の屈折率よりも大きい屈折率と、前記導波路の幅よりも狭い幅と、前記導波路の深さの半分以下の深さとを備えていることを特徴とする。

【 0 0 1 9 】また本発明の第 3 の光波長変換素子は、非線形光学効果を有する結晶と、前記結晶の表面に形成された導波路と、前記導波路を周期的に横断するように形成され、前記導波路よりも屈折率が高い高屈折率層とを含み、前記高屈折率層が、前記導波路を伝播する基本波は前記高屈折率層内を伝播できないが前記基本波の高調波は前記高屈折率層内を伝播しうる厚さを備えていることを特徴とする。

【 0 0 2 0 】また本発明の光発生装置は、上記光波長変換素子と半導体レーザとを含み、前記半導体レーザから出射された光を前記光波長変換素子により波長変換することを特徴とする。

【 0 0 2 1 】また本発明の光ピックアップは、上記光発生装置と集光光学系と記録メディアとを含む光ピックアップであって、前記光発生装置から出射された光を前記集光光学系により前記記録メディア上に集光することを特徴とする。

【 0 0 2 2 】

【発明の実施の形態】本発明は、非線形光学効果による第 2 高調波発生を利用した光波長変換素子において、基本モードの基本波と高次モードの第 2 高調波 (S H G 波) との位相整合を利用することでオーバーラップを大きくし、 S H G 波への変換効率を向上させるものである。

【 0 0 2 3 】以下にそのオーバーラップの増大の原理について説明する。ここでは、基本モードの基本波と高次モードの S H G 波との間で位相整合を図ることで、両モード間のオーバーラップを大きくし、変換効率の向上を図る原理について説明する。

【 0 0 2 4 】まず最初に、一般の光導波路における光波長変換について説明する。通常、光導波路の断面は図 1 (a) に示すように、基板 5 1 (屈折率 : n_s) と、導波層 5 2 (屈折率 : n_f) と、外層 (図 1 では省略) (屈折率 : n_c) とからなり、屈折率は $n_f > n_s > n_c$ で、導波するモードの電界分布は、基本モードの基本波 5 3 に対する、 1 次モード 5 4 および 2 次モード 5 5 の S H G 波は図 1 (b) に示すような状態になる。

【 0 0 2 5 】基本波 5 3 と S H G 波 5 4 , 5 5 との電界のオーバーラップは、図 1 (b) に示したように、基本モード間が最も大きく、 S H G 波の導波モードの次数が高くなるに従って低下する傾向にある。即ち、 S H G 波の変換効率はモードのオーバーラップに比例するため、基本モード間の位相整合が最も変換効率の高い変換となる。

【 0 0 2 6 】次に、 n_f より高い屈折率の外層を形成した場合について説明する。屈折率の高い外層を設けると、基本波のモード分布は高屈折率層側に偏り、導波路の表面近傍に強く閉じ込められる。従来の光波長変換素子では、このような基本波の強い閉じ込めを利用して、変換効率の向上が図られていた。

【 0 0 2 7 】しかしながら、基本波と高調波とでは波長が異なり、屈折率分散も存在するため、導波モードの分散はそれぞれ異なり (例えば基本波に比べて第 2 高調波はより強く高屈折率層に引きつけられる) 、モード間のオーバーラップの増大には限界があった。確かに、導波層より高い屈折率の高屈折率層を外層として用いると基本波の閉じ込めを強化することができるが、高屈折率層の厚みを厚くして基本波の閉じ込めを強化しようとする、波長の短い S H G 波は高屈折率層の内部に閉じ込められて素子の変換効率が極端に低下してしまうためである。

【 0 0 2 8 】ところが、同じ S H G 波でも、高次のモードを利用するとこの問題が解決される。この方法を、導波層の断面の深さ方向の電界分布を表した図 2 に基づいて説明する。図 2 は、基板 6 1 上に形成された導波層 6 3 において、高屈折率層 6 3 の厚みを変化させた場合の導波モードの様子を表したものである。

【 0 0 2 9 】図 2 (a) は高屈折率層が形成されていない場合であり、図 1 と基本的には同じ状態を示す。図 2 (b) は高屈折率層 6 3 が比較的薄い場合を示す。図 2

(b) において、高屈折率層 6 3 は、基本波 6 4、 S H G 波 6 5 に対するカットオフ条件 (その層内に閉じこもる導波モードが存在しない条件) を満足している。このとき基本波 6 4、 S H G 波 6 5 は、ともに高屈折率層 6 3 のみを導波することができないため、導波層 6 2 内を伝搬することになる。ただし、高屈折率層 6 3 により基本波 6 4 と S H G 波 6 5 の電界分布は表面近傍に引き寄せられている。図 2 (b) は、従来の高屈折率層を用いた光導波路の導波状態を示している。

10 【 0 0 3 0 】図 2 (c) は高屈折率層 6 3 が同図 (b) に示したよりも厚く形成されている状態を示す。この状態では、高屈折率層 6 3 は、基本波 6 4 に対してはカットオフ条件を満たすが S H G 波 6 6 に対しては低次のモード (この場合は基本モードの S H G 波 6 5) の伝搬が可能となっている。このとき、基本波 6 4 の閉じ込めは図 2 (b) と比べてさらに強くなる。しかし、基本モードの S H G 波 6 5 は、高屈折率層 6 3 内部に閉じこもってしまうため、基本波 6 4 から基本モードの S H G 波 6 5 への変換効率は極端に低下してしまう。

20 【 0 0 3 1 】ところが、図 2 (c) に示したように、高屈折率層 6 3 に導波可能なモードの次数より一つ高い次数のモードの S H G 波 (ここでは 1 次モードの S H G 波 6 6) は、大部分が導波層 6 2 を伝搬する。注目すべきことに、 S H G 波 6 6 の導波層 6 2 の電界分布 (図 2 (c)) が高屈折率層 6 3 が不在場合の基本モードの S H G 波の電界分布 (図 2 (a)) とほとんど変わらないことである。一方、基本波 6 4 の導波モードは強く高屈折率層 6 3 に引きつけられている (図 2 (c)) 。即ち、基本モードの基本波 6 4 は閉じ込めの強い導波モードになるのに対し、高次モードの S H G 波 6 6 は、高屈折率層 6 3 が存在しない場合とほとんど変化しないため、図 2 (c) に示したように、両モード間のオーバーラップが飛躍的に増大する。これを利用することにより基本波から S H G 波への変換効率を大幅に改善できる。

30 【 0 0 3 2 】図 2 (d) は高屈折率層 6 3 が同図 (c) に比べてさらに厚く、基本波 6 4 が高屈折率層 6 3 を導波可能となった状態を示す。基本波 6 4 が高屈折率層 6 3 を導波可能となると、図 2 (d) に示したように、導波層 6 2 内での基本波 6 4 と S H G 波 6 5 のオーバーラップが極端に減少するため、変換効率は大幅に低減してしまう。

40 【 0 0 3 3 】即ち、高屈折率の高屈折率層 6 3 を有する導波層 6 2 においては、図 2 (c) の状態となるように高屈折率層の厚さを調整することにより、基本モードの基本波 6 4 と高次モードの S H G 波 6 6 との間でオーバーラップが増大し、高効率の波長変換が可能となる。

【 0 0 3 4 】しかしながら、図 2 (c) の状態を実現するには、いくつかの条件を満足する必要がある。

【 0 0 3 5 】まず第 1 は、基本波 6 4 が高屈折率層 6 3 を導波不可能な状態となっていることが必要である。即ち、高屈折率層 6 3 の厚みと屈折率が、基本波 6 4 に対

しカットオフ条件を満足していることである。高屈折率層 6 3 が基本波 6 4 の導波条件を満足すると、図 2 (d) の状態に至って波長変換の効率が低下する。

【0036】第 2 は、高次モードの S H G 波が高屈折率層 6 3 を導波可能な状態となっていることである。高次モードにおいて、S H G 波の電界分布の主ピークが導波層 6 2 を伝搬し、サブピークが高屈折率層 6 3 を伝搬する条件を満足することである。高屈折率層 6 3 において S H G 波 6 5 がカットオフ条件を満たす場合、図 2 (b) の状態に至って波長変換の効率が低下する。図 2 (c) の状態を実現するには、高屈折率層 6 3 において S H G 波の導波条件が満足されなければならない。この条件を満足した状態で、高屈折率層 6 3 において、導波可能な次数のモードより一つ高い次数のモードの S H G 波 6 6 を選択的に導波させれば、導波層 6 2 に主ピークを有する導波モードになることが確認された。

【0037】このように、高屈折率層 6 3 を有する導波層 6 2 における高効率の波長変換素子を実現するためには、高屈折率層 6 3 の厚みと屈折率を、基本波 6 4 に対してはカットオフ条件、S H G 波 6 6 に対しては導波条件を満足するように選択すればよい。

【0038】さらに、高効率化を図るために、高屈折率層 6 3 の屈折率について調査した。素子の変換効率を高めるには、S H G 波の電界分布を導波層 6 2 に集中させる必要がある。即ち、高屈折率層 6 3 の電界分布をできるだけ小さくしたい。S H G 波の電界分布において、高屈折率層 (クラッド) と導波層 (コア) の電界分布の比は、それぞれの屈折率の比に依存する。例えば、導波層に対して高屈折率層の屈折率が増大するに従い、高屈折率層の電界分布が小さくなる。

【0039】従って、高屈折率層の電界強度を導波層における電界強度の例えば $1/10$ 以下にするためには、高屈折率層の屈折率 n_c を導波層の屈折率 n_f (グレーティッド状の屈折率分布を有する場合は導波層の最大の屈折率 n_{fmax}) に対し、 $n_c > 1.01n_f$ とすればよい。

【0040】なお、ここでは、単層の高屈折率層について説明したが、多層膜からなる高屈折率層についても同様の効果が得られる。多層膜を用いると、高屈折率層における屈折率分布の制御が可能になるため、素子設計の自由度が増し、作製許容度の高い素子の作製が可能となる。

【0041】また、導波層を伝搬する S H G 波のモードは、基本波の波長を選択することにより一義的に選択できるため、オーバーラップの大きな、高次モードとの位相整合を選択的に行え、高効率な波長変換が可能となる。

【0042】また、上記の導波層の構造が、耐光損傷強度の向上に非常に有効となることが確認された。導波層内での基本波と S H G 波とのオーバーラップが増大することにより、S H G 波と基本波とが重ならない部分にお

る電界が減少する。光損傷は、短波長光 (S H G 光) により結晶内の不純物が励起されて内部電界を生じることにより発生するが、基本波が介在すると不純物をトラップする準位を励起し、光損傷による内部電界が固定化する傾向にある。これは、S H G 波の電界分布近傍の基本波が単独で存在する部分で顕著となる。ところが、上記構成を採用すれば、基本波と S H G 波とが重ならない部分が極端に減少するため、光損傷の発生が大幅に低減できる。

【0043】以上の導波層の構造は、光波長変換素子のみならず、波長の異なる 2 以上の光を同時に導波させる光導波路について有効である。即ち、光導波路を伝搬する異なる波長の光のオーバーラップを高めて相互作用を増大させるために有効な構造である。

【0044】さらに、光の分布が表面近傍に引き寄せられるため、例えば光導波路上に集積化した電極等の素子による導波光への影響を高めることが可能となって効率の高い光集積回路素子を実現できる。

【0045】光導波路の具体的な構造としては、高屈折率層を導波路の表面近傍に設けた埋め込み型導波路構造が好ましい。このような構造を有する光導波路は、

- ・回折限界以下の集光特性を有し、
- ・横方向の光の閉じ込めが強化され、
- ・導波層の伝搬損失が小さく高効率化が可能で、
- ・光導波路形状誤差に対する許容度が大い、という効果を奏することができる。さらにイオン交換を利用すれば、作製プロセスが容易になるという製造上の利点を得られる。

【0046】以下、このような光導波路、この光導波路を有する光波長変換素子、光発生装置および光ピックアップについて具体的に説明する。

【0047】(実施の形態 1) 本実施形態では、短波長光発生装置の構成の例について説明する。図 3 に示したように、この短波長光発生装置は、半導体レーザ 7 1 と光波長変換素子 7 2 とを含み、半導体レーザ 7 1 より出射された基本波 P_1 は、レンズ 7 3、7 4 を介して光波長変換素子 7 2 に形成されている導波層 7 2 a に入射する。また、それぞれの部品は、マウント 7 5 に固定されている。

【0048】入射した基本波 P_1 は導波層 7 2 a 中を T E 0 0 モードで伝搬し、高調波の高次モードである T E 1 0 モードに変換される。この高調波は光波長変換素子 7 2 より放射され、短波長レーザビームとして使用される。ここで注目されるのは、導波層 7 2 a 内を伝搬する高調波 T E 1 0 モードのモードプロファイルである。T E 1 0 モードは高次の導波モードであるため、強度分布として例えば図 4 (b) に示すように 2 つのピークを有する。以下、2 つのピークのうち大きい方をメインピーク、小さい方をサブピークと呼ぶことにする。

【0049】サブピークを有する T E 1 0 モードは、集

光光学系で集光すると、導波モードと同様のサブピークを有する集光スポットを形成し、回折限界近傍の単一ピークの集光として使用する場合に問題となる。

【0050】そこで、高調波を集光する際に問題となるサブピークをほぼ解消する方法が新たに見い出された。それは、導波モードの状態におけるサブピークの幅を、集光に用いる集光光学系の回折限界に対し、十分小さな値にすることである。即ち、集光光学系の分解能以下の幅にサブピークを抑えることにより、集光スポットにサブピークが与える影響が解消される。

【0051】ここでは、 $NA = 0.95$ の集光レンズを用いて、波長 $\lambda = 425\text{ nm}$ の高調波を集光した。このときの空気中での光の回折限界は約 $0.34\text{ }\mu\text{m}$ である。サブピークの幅として、 $0.32\text{ }\mu\text{m}$ 以下になるように導波層72aを設計したところ、得られた集光スポットにおいてサブピークは全く観測されなかった。サブピークを有する高次の導波モードは、サブピークの幅が空気中での光の回折限界($0.8 \times \lambda / NA$)程度以下であれば、集光する際に、集光スポットに与える影響はなく、有効に利用できることが確認された。このためビーム整形により低下する出力の利用効率は、80%以上に向上させることが可能となった。

【0052】さらに、回折限界以下の幅を有するサブピークを有する導波光を利用すると、レンズの回折限界以下にビームを集光できる超解像効果が得られることがわかった。図4(a)にTE00モードを集光した場合と、同図(b)にTE10モードを集光した場合の集光スポットの形状を示す。TE00モードを集光すると、レンズの回折限界に近い値($0.8 \times \lambda / NA$)が得られた。一方、サブピークを有する高次のTE10モードを集光すると、サブピークを有する側のビーム形状が切り立った形になり、集光スポットの幅として回折限界の90%程度まで集光が可能となり、超解像効果を有することが確認された。

【0053】実験によると、サブピークの幅 w を空気中における波長 λ の光の回折限界($\sim 0.8 \times \lambda$)以下にすることで、集光スポットの幅が使用するレンズ(開口数: NA)の回折限界($0.8 \times \lambda / NA$)より小さくなっていることが明らかになった。このように、回折限界以下の幅を有するサブピークを有する導波モードを集光することにより、より小さな集光スポットが得られることが明らかになった。

【0054】さらに、サブピークの幅と集光スポットとの関係についてさらに詳しく調査したところ、

1) サブピークの幅: $\leq 0.8\lambda$

回折限界以下の集光特性(超解像効果)が得られる。

2) サブピークの幅: $0.8\lambda (1 + 0.2(1/NA - 1)) \sim 0.8\lambda (1 + 0.5(1/NA - 1))$

回折限界とほぼ同等の集光スポットが得られ、サブピークによる集光特性の劣化は観測されない。

3) サブピークの幅: $> 0.8\lambda (1 + 0.7(1/NA - 1))$

集光スポットにサブピークが現れ、集光特性が劣化する。

という結果が得られた。即ち、サブピークによる集光特性の劣化を防止するにはサブピークの幅を少なくとも $0.8 \times \lambda (1 + 0.5(1/NA - 1))$ 程度以下に抑えることが好ましい。

【0055】さらに、サブピークの幅を 0.8λ 以下になるように導波層を設計すると、集光レンズの回折限界よりさらに小さな集光スポットが得られて非常に有効である。一方、集光スポットの幅が用いたレンズの回折限界($0.8 \times \lambda / NA$)程度より大きいと、集光スポットは導波モードとほぼ等しい形状を有し、サブピークを有する2ピークの集光スポットとなり、単一ピークの集光スポットは得られない。

【0056】なお、本実施の形態では短波長光源として、基本波を高調波に波長変換する際に、導波モードを回折限界以下の幅のサブピークを有する高次モードに変換したが、他にサブピークを有する導波光を集光すれば、同様の効果が得られる。例えば、周期状のグレーティング構造を導波層上に設け、TE00モード導波光をTE10モードの導波光に変換し、これを集光することで超解像効果による回折限界以下の集光スポットを得ることができる。

【0057】なお、本実施の形態では、サブピークが一つのTE10モードを用いたが、さらに高次の導波モードでもサブピークの幅が回折限界であれば、同様の効果が得られる。例えば、メインピークの両側にサブピークを有するTE20モードであれば超解像効果はさらに強くなり、より小さなスポット径が得られて有効である。

【0058】また、深さ方向だけでなく、幅方向にサブピークを有するTE01、TE02モード、および幅深さ両方向にサブピークを有するTE11、TE22でもより小さな集光スポットが得られて有効である。なお、本実施の形態ではTEモードを扱ったが、他にTMモードでも同様の効果が得られる。

【0059】(実施の形態2)次に、短波長光発生装置の基本構成要素である光波長変換素子について説明する。図5に示したように、この短波長光発生装置には、X板のLiNbO₃基板76の表面近傍にストライプ状の導波路77が形成されている。このLiNbO₃76基板には、位相整合のために分極反転部79が導波路77を周期的に横断するように形成されている。また、導波路77の表面近傍には高屈折率層78が形成されている。導波路77の幅 W_1 は $4\text{ }\mu\text{m}$ 、深さ D_1 は $2.5\text{ }\mu\text{m}$ であり、高屈折率層78は幅 W_2 は $3\text{ }\mu\text{m}$ 、深さ D_2 は $0.2\text{ }\mu\text{m}$ である。図5(a)に示したように、高屈折率層78は導波路77に沿って、またそのほぼ中央部に形成されている。

【0060】導波路77は、LiNbO₃結晶をプロト

ン交換した後アニール処理して形成され、 LiNbO_3 内の Li の一部が H に交換されて、 $\text{Li}_{1-x}\text{H}_x\text{NbO}_3$ ($0 < x < 1$) で示される組成を有する。ここで、 x はプロトン交換の交換率である。アニール処理により、 x の値は 0.3 以下にまで低下していることが好ましい。

【0061】高屈折率層 78 も同様にプロトン交換により形成されている。導波路 77 より高い屈折率を得るため、高屈折率層 78 は、導波路 77 より高いプロトン交換率 x を有している。具体的には、 x は 0.6 以上であることが好ましい。この光波長変換素子では、例えば波長 850 nm の基本波が TE00 モードで入射され、導波路 77 内で TE10 モードの高調波と擬似的に位相整合する。

【0062】この光波長変換素子において、高調波へ高効率で波長変換できる原理について説明する。前述のように、高屈折率層を有する導波層においては、基本波と高調波間でのオーバーラップが増大し、導波光の閉じ込めが強化され高効率の波長変換が可能となることを示したが、本実施形態の構成によりさらにこの効果が強調されより高い変換効率が得られる。

【0063】図 6 に本実施の形態の光波長変換素子における導波モードの分布を示す。同図(a)に、表面にスラブ状の高屈折率層 82 を有する導波路 81 におけるモード分布を比較のため示し、同図(b)にストライプ状の高屈折率層 78 を有する導波路 77 における導波モードの分布を示す。深さ方向の電界分布は同図(a)、(b)ともにほぼ等しいが、導波路の幅方向の電界分布は、(b)において電界分布の幅が小さくなり、より強い閉じ込めが達成されている。

【0064】さらに、閉じ込めが強化された結果、同図(b)の基本波、高調波間のオーバーラップも向上し、変換効率は、同図(a)に示すスラブ状の高屈折率層を有する導波路の 1.5 倍程度になった。この結果、スラブ状の高屈折率層を有する光波長変換素子に比べ、変換効率が 2 倍以上に向上した。

【0065】次に、高次の高調波のモードプロファイルについて述べる。TE10 モードは導波路の深さ方向に 2 つの強度ピークを持ち、高屈折率層側にサブピークを有する。高屈折率層内はプロトン交換率が高く非線形性が小さいため、サブピークにおける電界分布は基本波から高調波への変換に寄与しない。そのためサブピークにおける電界分布の存在はできるだけ制限するのが好ましい。このため、前述したように、高屈折率層の屈折率 n_c の大きさを導波路の屈折率 n_f の 1.01 倍以上とすることが好ましい。

【0066】次に、高屈折率層の厚みについて述べる。高屈折率層の膜厚の増加とともに、高屈折率層における電界分布の量が増大するため、高屈折率層の膜厚 D_1 を制限することが好ましい。高効率化を図るためには、少

なくとも導波路の厚み D_1 は高屈折率層の厚み D_2 の 2 倍以上であることが好ましい。 $D_1 < 2 \times D_2$ になると変換効率は最大値の 1/2 以下に減少してしまう。

【0067】次に、集光特性の観点から高屈折率層と導波路との屈折率の関係について説明する。サブピークを有する導波光をレンズ系で集光する際、サブピークの大きさにより集光特性が劣化する。前述のように、集光スポットをシングルスポットにし、回折限界と同等またはそれ以下の集光スポットを得るには、導波モードのサブピークを集光レンズの回折限界以下に低減する必要がある。そのため、高屈折率層の厚み D_2 を規定することが好ましい。サブピークの幅は、高屈折率層の厚さと屈折率により規定されるが、高屈折率層の厚さとほぼ等しくなる。従って、サブピークの幅を回折限界以下に抑えるには、高屈折率層の厚みを高調波の回折限界以下に抑える必要がある。

【0068】具体的には、波長 425 nm の高調波に対し、高屈折率層の厚みが 0.6 ~ 0.7 μm よりも大きい ($D_2 > 0.7 \mu\text{m} \sim 0.6 \mu\text{m}$) 時、 $\text{NA} = 0.6$ 程度のレンズを用いると集光特性が劣化した。 $D_2 = 0.5 \mu\text{m}$ 程度の時はかなり集光特性が改善され、 $D_2 < 0.4 \mu\text{m}$ のときは、回折限界以下の集光特性が得られた。 $\text{NA} = 1$ 、波長 425 nm と仮定して回折限界を計算すると約 0.34 μm なので、ほぼ回折限界より小さな D_2 であれば、集光特性に優れた出射ビームが得られることがわかる。

【0069】次に、高屈折率層の幅 W_2 について説明する。導波モード間のオーバーラップの向上ならびに閉じ込め効果の向上により高効率化が図れるが、さらに高効率化を図るには、高屈折率層の幅 W_2 は導波路の幅 W_1 より小さいことが望ましい。導波路の横方向の閉じ込めが強化され高効率化が図れるからである。 W_2 が W_1 以上のときは、導波路を伝搬する導波モードの電界分布はスラブ状の高屈折率層を有する導波路とほぼ等しく、効率の向上は見られなかった。 $W_2 < 0.9 \times W_1$ のとき変換効率向上が確認され、 $W_2 < 0.8 \times W_1$ のとき変換効率は 1.5 倍以上に向上した。

【0070】また、高屈折率層の幅を導波路の幅より狭くする構造は、プロトン交換による導波路内にプロトン交換による高屈折率層を形成する方法のみならず、導波路の表面に高屈折率の誘電体を堆積する構造においても有効に作用することが確認できた。

【0071】次に、高屈折率層の屈折率について説明する。プロトン交換部分は $\text{Li}_{1-x}\text{H}_x\text{O}_3$ ($0 < x < 1$) となっており、 LiNbO_3 結晶内の Li の一部が H に交換されている。 x はプロトン交換の交換率である。

【0072】導波路および高屈折率層は共にプロトン交換により形成されているが、プロトン交換率は相違する。プロトン交換直後の x 値は、0.9 程度と非常に高

10

20

30

40

50

い。アニール処理により x の値は調整可能であり、非線形性を回復させるには、0.5以下の交換率まで低下させる必要がある。また、交換率はプロトン交換層の屈折率と比例関係にあり、交換率が低下すると屈折率も低下する。

【0073】光波長変換素子の導波路は強い閉じ込めと高い非線形性を必要とするが、アニール処理により非線形性の回復を図ると屈折率が低下し、閉じ込めが弱くなる。非線形性を基板の80%程度まで回復するには、 x の値を0.3程度まで低下させる必要があり、この状態では導波路の屈折率が低くなり、基本波を十分閉じ込めるのが難しくなる。ところが導波層の上部に高屈折率層を形成すると、導波層の閉じ込めが強化され、閉じ込めが強く、非線形性の高い光導波路の形成が可能となった。導波層の閉じ込め強化を図るには、高屈折率層のイオン交換濃度を高める必要があり、導波層の2倍以上($x > 0.6$)のイオン濃度とすることが好ましい。

【0074】なお、本実施の形態では、高屈折率層としてプロトン交換層を用いたが、他に高屈折率の誘電体でも同様の効果が得られる。プロトン交換の場合、導波層の内部に高屈折率層を形成したが、誘電体膜を堆積して高屈折率層とする場合にも、導波層の表面に選択的に堆積して導波層を形成することが好ましい。

【0075】誘電体として、 LiNbO_3 よりも屈折率の高い Nb_2O_5 を用いた。導波路表面に200nmの厚みの Nb_2O_5 をスパッタリング法により堆積し、導波路に沿ってその中央部に形成した。ただし、導波路表面にバターニングして、高屈折率層をリッジ形状に加工する際にリッジ形状の側面にわずかな凹凸が形成された。これによって、光導波路の伝搬損失が増加したため、イオン交換で形成した導波層の方が導波光の伝搬損失が小さいという点では優れていることがわかった。

【0076】なお、本実施の形態ではX板の基板を用いたが、他にY板、Z板、また結晶軸が表面から傾いた基板を用いてもよい。Z板または結晶軸が基板表面から傾いた基板を用いると深い分極反転構造の形成が容易であり、高効率化が図れる。

【0077】また、本実施の形態でTEモードの偏光方向を利用したのは、通常の半導体レーザの導波路の偏光方向と一致させるためである。半導体レーザと同じ偏光方向を有する光導波路にすることで、導波路同士を低損失で結合させることが可能となる。ただし、TMモード偏光の光導波路も利用可能である。TMモードの光導波路は、偏光方向を $\lambda/2$ 板により制御することで結合損失を低減することが可能である。

【0078】さらに、本実施の形態では、光導波路を用いた光波長変換素子について説明したが、本実施形態の光導波路は、他の光導波路素子にも有効である。高屈折率層を光導波路上に形成することにより、光導波路を伝搬する導波光の電界分布は表面近傍に強く引き寄せられ

る。このため、導波路上に形成するプレーナ電極や、グレーティング素子の影響を導波光に強く与えることが可能となり、効率の高い変調および回折効果を得ることができる。

【0079】なお、本実施の形態では基板に LiNbO_3 基板を用いたが、他に MgO 、 Nb 、 Nd 等をドーパした LiNbO_3 、または LiTaO_3 またはその混合物である $\text{LiTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 基板、そのほかKTP (KTiOPO_4) でも同様な素子が作製できる。 LiTaO_3 、 LiNbO_3 、KTPはともに高い非線形性を有するため、高効率の光波長変換素子が作製できる。

【0080】(実施の形態3) 次に、本発明の光波長変換素子の構成の他の例として、高屈折率層をイオン交換により形成した場合について述べる。本実施形態の光波長変換素子の構成図を図7に示す。図7に示したように、X板の LiNbO_3 基板83の表面近傍に、ストライプ状の導波路84が形成されており、導波路84の表面近傍には、プロトン交換による高屈折率層85が形成されている。 LiNbO_3 基板83には、位相整合のために導波路を周期的に横切るように分極反転部86が形成されている。

【0081】イオン交換により形成した高屈折率層85は、

- ・面内における膜厚の均一性に優れており、面内バラツキを $\pm 0.1\%$ 以下に抑えることができ、
- ・膜厚の制御性に優れ $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 以下で膜厚を制御でき、
- ・高調波、基本波に対する伝搬損失がともに小さく、
- ・導波層との境界部における歪み等が小さく伝搬損失や面内分布を与えない点で優れている。

【0082】高屈折率層には基板よりも高い屈折率を有していることが求められるが、基本波、高調波に対する伝搬損失が低いことも求められる。特に高調波は400nm程度と短波長なので、伝搬損失の増大が著しい。例えば、高屈折率の誘電体としては Nb_2O_5 、 TiO_2 等が通常用いられるが、誘電体の吸収端に近づくこともあり、短波長の光に対する伝搬損失が増大する傾向にある。そこで、高屈折率層をイオン交換により形成することを試みた。イオン交換層は基板の透過特性とほぼ等しく短波長光に対する伝搬損失の増大が小さい点で有利である。

【0083】イオン交換は本実施の形態に用いられる強誘電体結晶に容易に適用できる。例えば LiNbO_3 にイオン交換の一種であるプロトン交換を施すと、屈折率変化が0.1程度と非常に大きな値が得られ、高屈折率の層が容易に形成できる。

【0084】これに加え、イオン交換は深さの制御が容易であり、均一性の高い層が形成できるという特徴を有する。例えばスパッタリング法等により誘電体を成膜し

て高屈折率層を形成する場合、通常の装置では面内均一性は $\pm 1 \sim 3\%$ 程度である。これに対して、イオン交換は拡散により形成するため、拡散温度と時間の制御により厚みのバラツキは $0.01 \mu\text{m}$ 以下とすることができる。さらに、面内の均一性も厚みの制御と同等の制御が可能であり、スパッタリング等の成膜による方法に比べ2桁以上高い精度が達成される。具体的には Nb_2O_5 スパッタ膜を用いた素子とプロトン交換による光波長変換素子の特性を比較したところ、プロトン交換により形成した素子は、 Nb_2O_5 のスパッタ膜を用いた素子に比

べ、均一性が一桁以上高い値を示し、SHGの変換効率が2倍以上高いことがわかった。
【0085】次に、前述した導波モードのサブピークを導波光の回折限界以下にする方法について述べる。導波モードのサブピークの幅は、高屈折率層の厚みと屈折率により決定される。ただし、サブピークの幅は高屈折率層の厚み程度か、それ以上にしかならないので、高屈折率層の幅は少なくとも、導波光の回折限界の幅以下に抑える必要がある。さらに、高屈折率層の屈折率を導波層の屈折率の1.01倍以上とすることが好ましい。

【0086】高屈折率層の幅が導波層の幅より狭い場合、高屈折率層の屈折率が導波層の1.01倍未満になると、サブピークの幅が高屈折率層の厚みより大幅に増大し、高調波出力の集光特性が劣化し、回折限界までの集光が難しくなった。

【0087】さらに、高屈折率層の屈折率と厚みを制御し、サブピークの幅と集光特性の関係を調べた。その結果、実施の形態1で示したと同じ結果が得られ、同様にサブピークの幅を導波光の回折限界以下に設定することにより、集光特性の優れたビームが得られることが確認された。

【0088】以上より、高屈折率層の膜厚を導波光の回折限界以下にすることで、集光特性に優れた出射ビームを得られることがわかった。

【0089】次に、本発明の光波長変換素子が作製誤差に対する許容度に優れている点について説明する。光波長変換素子は、導波路内で基本波から高調波へ変換する際に基本波と高調波との位相整合条件の成立が必要である。位相整合条件とは、基本波と高調波との位相速度をそろえる条件で、基本波・高調波間での実効屈折率制御が必要となる。

【0090】光導波路を用いた場合、光導波路の全長に渡り位相整合条件を成立させなければならない。ところが、位相整合条件に対する許容度はかなり狭く、実際の光導波路型の光波長変換素子を形成する際には、導波路幅、屈折率変動等を極限まで管理する必要がある。例えば、 LiNbO_3 を用いた擬位相整合型の光波長変換素子の場合、導波路長10mmに渡り、導波路幅を $4 \mu\text{m}$ で $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以下に制御する必要があり、作製歩留まりを低下させる原因になっていた。

【0091】この原因は、図8の(a)に示すように、導波路の幅に対する位相整合波長の変動が大きいことである。光波長変換素子の位相整合波長の許容度は、素子長10mmの場合 $0.1 \mu\text{m}$ 程度であり、例えば、導波路の幅が $0.1 \mu\text{m}$ ずれると、位相整合波長の許容度からはずれてしまう。導波路の幅が伝搬方向でわずかに変化したとき、その各部分で位相整合波長が異なることになり、特定の波長の基本波を入射した場合、一部の位相整合条件が成立する幅の導波路の部分でしか高調波が発生しない。このため、導波路長全城にわたり形成した分極反転構造はその一部しか光波長変換に寄与しなくなり、変換効率が低下する。また、高屈折率層を導波路表面にスラブ状に形成した光導波路においても、同様の特性を示し、光導波路の作製誤差は $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以下と厳しかった。

【0092】ところが、本実施形態の光導波路構造を有する光波長変換素子においては、図8の(b)に示すように、導波路の幅に対する位相整合波長の変動が非常に小さいことが見出された。即ち、位相整合波長の許容度を満足する導波層の幅の許容度が $\pm 0.5 \mu\text{m}$ まで増大し、従来の5倍の許容度まで拡大されることがわかった。このため、従来、光導波路の作製誤差により特性を落としていた光波長変換素子の変換効率を、2倍以上に向上させることができた。

【0093】なお、本実施の形態ではX板の基板を用いたが、他にY板、Z板、また結晶軸が表面から傾いた基板を用いてもよい。Z板または結晶軸が基板表面から傾いた基板を用いると深い分極反転構造の形成が容易であり、高効率化を図ることができる。

【0094】また、本実施の形態ではTEモードの偏光方向を利用したが、その理由は、通常の半導体レーザの導波層の偏光方向と一致させるためである。半導体レーザと同じ偏光方向を有する導波層にすることで、導波層同士を低損失で結合させることが可能となる。ただし、TMモード偏光の導波層も利用可能である。TMモードの導波層は、偏光方向を $\lambda/2$ 板により制御することで結合損失を低減することが可能である。

【0095】さらに、本実施の形態では、光導波路を用いた光波長変換素子について説明したが、本発明の光導波路は、他の光導波路素子にも有効である。高屈折率層を光導波路上に形成することにより、光導波路を伝搬する導波光の電界分布は表面近傍に強く引き寄せられる。このため、導波路上に形成するプレーナ電極や、グレーティング素子の影響を導波光に強く与えることが可能となり、効率の高い変調および回折効果が得られた。

【0096】また、本実施の形態では基板に LiNbO_3 基板を用いたが、他に MgO 、 Nb 、 Nd 等をドーブした LiNbO_3 、または LiTaO_3 またはその混合物である $\text{LiTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 基板、そのほかKTP (KTiOPO_4) でも同様の素子が作製

できる。 LiTaO_3 、 LiNbO_3 、 KTP はともに高い非線形性を有するため、高効率の光波長変換素子が作製できる。

【0097】（実施の形態4）本実施の形態では、光波長変換素子の別の構成について述べる。この光波長変換素子は、図9(a)に示すように、X板の $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板91上に周期状に形成された分極反転部94と導波路92とが形成されている。 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板91は、結晶のZ軸が基板の表面に対して 3° 傾くように基板を切り出している。結晶軸の傾いた基板を用いると、深い分極反転部94を形成できるため、高効率の光波長変換素子が構成できる。これは分極反転部94が結晶のZ軸に沿って形成されるため、基板表面から基板内部へと成長するためである。そこでこの性質を利用して図9に示したような光波長変換素子を作製した。

【0098】図9(b)には、導波路92に沿って基板を切断した断面図を示す。図9(b)に示すように、分極反転部94は基板内部に形成されており、表面の高屈折率層93と導波路92との境界近傍部分から基板内部へと形成されており、高屈折率層93の内部には分極反転構造が存在しないように形成されている。これによって、光波長変換素子の高効率化が図れる。以下、その理由について説明する。

【0099】光波長変換素子の変換効率は、前述したように、分極反転部94の構造と導波路92とを伝搬する導波光（基本波、高調波）とのオーバーラップに依存する。ところが、高効率化のため、高調波は高次の導波モード（TE10モード）を用いるため、電界分布としては、高調波は高屈折率層93と導波路92とで電界の位相が逆転している。このため、高屈折率層でのオーバーラップは高調波への変換を低下させる。

【0100】これを防止するには、高屈折率層93でのオーバーラップが、波長変換に影響を与えないようにする必要がある。そこで、図9に示すように、高屈折率層93における周期状の分極反転構造をなくすことで、高屈折率層93のみを選択的に位相整合条件が成立しないようにできる。これによって、光波長変換素子の高効率化を図ることができた。

【0101】なお、本実施の形態では結晶軸が 3° 傾いた結晶を用いたが、結晶の傾きは 5° 以下ならば、深い分極反転構造が形成できるため使用できる。特に $0.5^\circ \sim 3^\circ$ の傾きは分極反転の傾きが小さく、使用面積が増大するために好ましい。

【0102】（実施の形態5）次に、光波長変換素子における光導波路の作製方法について述べる。ここでは、イオン交換の一種であるプロトン交換を用いた光導波路形成について図10を用いて説明する。

【0103】図10(a)は、 LiNbO_3 基板95の表面に耐イオン交換マスクとしてTa膜96を堆積し、フォトリソグラフィ法とドライエッチングとを用いて、幅 $4\mu\text{m}$ の導波路パターンを形成する工程である。この工程の後、同図(b)に示すように、基板95を 200°C のピロ燐酸中で熱処理し、非マスク部分の結晶のLiと酸中のプロトン(H^+)を交換し、第1のプロトン交換部97を形成する。次に、同図(c)に示すように、プロトン交換部をアニール処理し、イオン交換部の体積を増大させて導波路とする。同図(d)に示すように、再度ピロ燐酸中で熱処理し、非マスク部分に第2のプロトン交換部98、即ち高屈折率層を形成する。さらに、 160°C 以下の低温でアニール処理することにより高屈折率層の厚みを微調整し、最適な導波路構造を形成した。

【0104】第1のプロトン交換部97は、 200°C で6分程度プロトン交換を行うことにより、 $0.2\mu\text{m}$ 程度の厚さとした。これを 300°C で60分間程度アニール処理することにより、交換層深さは約 $2.5\mu\text{m}$ に、幅は $5\mu\text{m}$ 以上に拡大した。このようにして形成された導波路のプロトン交換率は、アニール処理により低減され、非線形性が回復した。

【0105】また、耐酸化性に優れたTaをマスクに用いることにより、プロトン交換はもとより、その後のアニール処理による膜質の変化は観測されなかった。そこで同じマスクを使って再度プロトン交換を行うと、導波路の内部に高屈折率層が形成される。

【0106】導波路はアニール処理により幅、深さともに広がっているため、第2のイオン交換により形成される高屈折率層は、光導波路より幅の小さな層とすることができる。

【0107】さらに、形成した導波路を、 160°C 以下の低温でアニール処理することにより、導波路の特性を変えることなく、伝搬損失を大幅に低減できることがわかった。低温でアニール処理することにより、第1および第2のイオン交換部の拡散をわずかに抑え、同時にアニールによる導波路の伝搬損失の低減が図れた。

【0108】次に、作製した光導波路の特性を調べた。波長 850nm の基本波を入射し、導波する光のモード分布を調べた。導波路幅 $4\mu\text{m}$ 、深さ $2\mu\text{m}$ とし、導波光のNFP（近視野像）を観測することで、導波モードの分布を測定した。測定は、前述の方法により作製した(1)ストライプ状（線状）の高屈折率層を有する光導波路、(2)高屈折率層を有さない光導波路、(3)スラブ状の高屈折率層を有する光導波路についてそれぞれ測定した。結果を以下の表に示す。但し、表中のモードの幅は、強度分布が $1/e^2$ になる幅を示している。

【0109】

[μm]

21

22

導波モードの厚さ	1 . 7	2 . 5	1 . 8
導波モードの幅	3	4	3 . 5

【 0 1 1 0 】 上記結果から、ストライプ状の高屈折率を設けることにより、光導波路の閉じ込めが深さ方向および幅方向に強まり、パワー密度の高い光導波路が形成できることがわかった。

【 0 1 1 1 】 さらに、ストライプ状の高屈折率層を用いると、導波モードの電界分布を導波路の伝搬方向に従い変形できるという特性を有する。例えば、

・ 光導波路の入射部においてレーザ光の光導波路結合効率を向上させる入射テーパの形成、

・ 出射ビームのアスペクト比を 1 : 1 に整形するモード整形、を行うことができる。

【 0 1 1 2 】 まず、最初に、入射テーパについて図 1 1 を用いて説明する。図 1 1 において、LiNbO₃ 基板 1 0 1 に導波層 1 0 2 が形成され、導波層 1 0 2 の表面近傍に線条の高屈折率層 1 0 3 が形成されている。高屈折率層 1 0 3 は入射部近傍でテーパ状にその幅が狭くなっている。高屈折率層 1 0 3 を有する導波層 1 0 2 は、上記表に示すように高屈折率層 1 0 3 により閉じこめが強化され、導波モードの分布は小さくなっている。そこで、導波層 1 0 2 の入射部に近傍で高屈折率層をテーパ状に加工し、入射部に行くに従いテーパ部の幅を減少させてやれば、入射部に近づくに従い、導波層 1 0 2 の閉じこめが弱くなって導波モードの断面積を大きくすることができる。

【 0 1 1 3 】 具体的には、高屈折率層 1 0 3 の幅を 4 μm 以上から 0 . 5 μm まで絞り込んだところ、導波モードの電界分布は高屈折率層 1 0 3 がいない場合と等しくなり拡大した。導波モードの大きさは、導波部で深さ 1 . 7 μm、幅 3 μm であったのが、入射部では深さ 2 . 5 μm、幅 4 μm まで拡大することができた。これによって、半導体レーザとの結合効率を従来の 1 . 3 倍に向上させることが可能となり、結合精度の許容度も 1 . 5 倍に向上した。

【 0 1 1 4 】 上記の効果を得る方法は他にもある。例えば、入射部近傍では、ストライプ状の高屈折率層を、分断して島状に形成する方法である。入射部での高屈折率層の形成部分と非形成部分との比率を変化させることにより、導波路の実効的な閉じこめを変えることができる。具体的には、矩形状の周期を 2 μm とし、有り無しの比率を 1 0 0 % ~ 1 0 % まで、導波路の入射部に近づくに従って徐々に矩形の高屈折率層の割合を減らしていった。これによっても、テーパ形状と同様の効果が得られ、結合効率の高いテーパ導波路が形成できた。このように光導波路においては、高屈折率層を、導波方向単位長さ当たりの高屈折率層の割合が端部に近づくに従って小さくなるように形成することが好ましい。

【 0 1 1 5 】 同様に、出射ビームの形状を変えることもできる。出射部で高屈折率層 1 0 3 の幅を変えて、出射ビームのアスペクト比を 1 : 1 に近づけることができた。

【 0 1 1 6 】 なお、本実施の形態では X 板の基板を用いたが、他に Z、Y 板の基板または、結晶軸から傾いた表面を持った基板等、結晶軸に関係なく使用できる。また、本実施の形態では基板に LiNbO₃ 基板を用いたが、他に MgO、Nb、Nd 等をドープした LiNbO₃、または LiTaO₃ またはその混合物である LiTaO_{3-x}Nb_xO₃ (0 ≤ x ≤ 1) 基板、そのほか KTP (KTiOPO₄) でも同様な素子が作製できる。LiTaO₃、LiNbO₃、KTP はともに高い非線形性を有するため、高効率の光波長変換素子が作製できる。

【 0 1 1 7 】 (実施の形態 6) 本実施の形態では、本発明の光波長変換素子を用いた短波長光発生装置の別の例について説明する。構成としては、波長 8 0 0 nm 帯の半導体レーザ、集光光学系および光波長変換素子より構成され、半導体レーザから出射した光を集光光学系により光波長変換素子の導波路短面に集光し、導波モードを励起する。

【 0 1 1 8 】 光波長変換素子の他の導波路端面より、波長変換された SHG 光が出射する。変換効率が高い光波長変換素子が実現したため、出力 1 0 0 mW 程度の半導体レーザを用いて、1 0 mW の青色 SHG 光が得られた。また、用いた光波長変換素子は耐光損傷性に優れ、安定な出力が得られたため、出力変動が 2 % 以下である安定な出力が得られた。4 0 0 nm 帯の波長は、印刷製版、バイオ、蛍光分光特性等の特殊計測に、光ディスク等、広い応用分野において望まれている。本発明の光波長変換素子を用いた短波長光源は、出力特性、安定性ともにこれらの応用分野での実用化が可能である。

【 0 1 1 9 】 なお、本実施の形態では半導体レーザの光を集光光学系を用いて光導波路に結合させたが、半導体レーザと光導波路を直接結合させることも可能である。TE モード伝搬の光導波路を用いると、半導体レーザの導波モードと電界分布を等しくすることが可能となるため、集光レンズなしでも高効率で結合できる。実験では結合効率 8 0 % で直接結合が可能であり、レンズ結合とほぼ同等の結合特性が得られることを確認した。直接結合を用いると小型で、低価格の光源が実現できる。

【 0 1 2 0 】 (実施の形態 7) 本実施の形態では、光ピックアップについて説明する。図 1 2 に本発明の光ピックアップの例を示す。図 1 2 においては、実施の形態 1 に示した短波長光発生装置 1 0 5 から出た出力 1 0 mW のビームは、ビームスプリッタ 1 0 6 を透過し、レンズ

107により光情報記録媒体である光ディスク108に照射される。光ディスク108からの反射光は、逆にレンズ107によりコリメートされ、ビームスプリッタ106で反射され、ディテクタ109で信号が読みとられる。なお、短波長光発生装置105の出力を強度変調することで、光ディスク108が記録も可能である場合には、情報を書き込むこともできる。

【0121】短波長光発生装置105から出力されるのは、サブピークを有するTE10モードであるが、これを集光するとレンズの回折限界以下の小さなスポット径の集光ビームが得られた。これによって、短波長光による集光特性に加え、超解像効果による小さなスポット径が得られた結果、記録密度を従来の1.2倍に向上させることが可能となった。

【0122】さらに、高出力の青色光の発生が可能となるため、読み取りだけでなく、光情報記録媒体へ情報を書き込むことも可能となった。半導体レーザを基本波光源として用いることで、非常に小型になるため、民生用の小型の光ディスク読み取り、記録装置にも利用できる。

【0123】さらに、光波長変換素子は、光導波路幅を最適化することで、出力ビームのアスペクト比の最適化が行える。例えば、光導波路上に導波路幅より狭い高屈折率層を有する導波路構造をとることで、出射ビームのアスペクト比を1:1に近づけることが可能となる。

【0124】光ピックアップの集光特性を向上させるため、ビーム成形プリズム等が不要になり、高い伝達効率、優れた集光特性、低価格化が実現できた。さらに、ビーム成形時に発生する散乱光のノイズが低減でき、ピックアップの簡素化が実現できた。

【0125】(実施の形態8)本実施形態では、イオン交換層を用いた別の光波長変換素子について説明する。図13に示したように、非線形光学効果を有する結晶の基板31の表面に、イオン交換層34と導波層33とが形成されている。イオン交換層34は、上記と同様、プロトン交換により形成しうるものであって基板31よりも高い屈折率を有する高屈折率層である。また、基板の表面には、導波層33を周期的に横断するように分極反転部32が形成されている。この基板31では、分極方向と基板表面とが $1^{\circ} \sim 5^{\circ}$ の角度を有しているため、分極反転部32も基板表面とこの範囲の角度を有している。

【0126】このような光波長変換素子において光導波路内の分極反転部の深さと、波長変換効率との関係について調査した。図14に示したように、分極反転部の深さは導波層33の幅の中央における、基板表面と分極反転部32の上端との間の距離dにより示すこととする。また、高屈折率層は、プロトン交換により形成した。分極反転部の厚さは約 $2 \mu\text{m}$ 、導波層の厚さは約 $3 \mu\text{m}$ とした。なお基板31としては、分極方向が基板表面と約

3° 傾いた、MgOをドーブしたLiNbO₃を用いた。

【0127】その結果、 $d=0$ の場合と比較して、dが0.2~0.5 μm のときの変換効率は、約2倍となった。dを0.2~0.3 μm とすると変換効率はさらに向上した。一方、 $d>1 \mu\text{m}$ とすると変換効率は $d=0$ の場合とほぼ同じとなった。もっとも、dの好ましい範囲は光導波路の深さに依存するため、dは光導波路の深さに応じて光導波路と分極反転部とのオーバーラップが大きくなるように定めることが好ましい。

【0128】さらに、この光波長変換素子における光損傷について調査した。上記調査において、dを好ましい値とすると、変換効率は向上するものの光損傷強度が低下する場合があったからである。光損傷は、分極反転部が存在しない、光導波路の表面で生じたものと考えられる。そこで、dと高屈折率層の厚みDとの関係を調整したところ、 $D>d$ のときに光損傷が改善することが見出された。一方 $D<d$ では高屈折率層の効果は顕著には認められなかった。これはプロトン交換層である高屈折率層が、電気光学定数の劣化および電気伝導度の向上により、光損傷の発生を抑制したためと考えられる。また、高屈折率層を光導波路の表面に形成することにより導波光のオーバーラップも大きくなり、変換効率も向上させることができた。

【0129】なお、高屈折率層は、図示したように、基板表面全体に形成されていてもよいが、光導波路の表面近傍の基板表面のみに形成されていても構わない。

【0130】以下、図示したように、基板表面に対して一定の角度を有するように分極反転部を形成する方法について説明する。このような分極反転部は、結晶の分極方向が表面に対して傾いている基板(例えば強誘電体結晶基板(MgOをドーブしたLiNbO₃))を用い、この結晶の表面に離間して配置した2つの電極間に絶縁膜を配置して電圧を印加することにより、形成することができる。

【0131】この場合、通常に分極反転部の形成方法に従い、図15に示したように、基板191の表面に櫛形電極192と棒状電極193とを形成し、両電極間に電圧を印加して櫛形電極から分極反転部を伸長させる方法を採用することもできる。しかし、分極反転部を均一にかつ一定以上の深さに形成するためには、基板表面に形成した絶縁膜195を利用することが好ましい。

【0132】その場合、図16~図18に示す方法を採用することができるが、図17および図18に示したように、棒状電極193を絶縁膜195の上に形成することが好ましい。このようにすれば部分極反転構造の均一性を改善することができる。また、図17に示したように分極反転の起点となる棒状電極192を絶縁膜195により覆うことがさらに好ましい。

【0133】絶縁膜195としては、特に限定されない

が、例えばスパッタリング法により形成した SiO_2 膜を用いることができる。図 1 7 に示したような方法を採用する場合の膜厚は 1 0 0 n m 未満では効果がほとんどなく、2 0 0 n m 以上とすると、図 1 9 に示したように均一で深い分極反転部 1 9 4 の形成が可能となる。しかし、1 μ m 以上堆積しても反転特性に大きな変化はなく、これほどまでに厚くするのは生産効率上好ましくはない。従って、絶縁膜の膜厚は 2 0 0 n m ~ 1 μ m とすることが好ましい。

【 0 1 3 4 】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、優れた集光特性を有する第 2 高調波出力が可能で、かつ基本波と第 2 高調波とのオーバーラップを大きくした光波長変換素子を提供することができる。特に、高屈折率層を有する導波層構造において、イオン交換により高屈折率層を形成することにより、高屈折率層の低損失化、均一化の大幅な改善が可能となった。さらに、高次の導波モードのサブピークの幅を光の回折限界以下に抑えることにより、出力される高次モードの高調波は超解像効果を有し、集光特性が飛躍的に向上するため、その実用効果は大きい。

【 0 1 3 5 】また、屈折率の高い高屈折率層を、導波層の幅より狭いストライプ構造にすることにより、導波層の幅方向の閉じ込めも強くすることができ、これによって、光波長変換素子の効率をさらに向上させることが可能となった。

【 0 1 3 6 】また、本発明の光発生装置によれば、出力するビームの集光特性を大幅に向上させることができる。同時に、高い変換効率の光波長変換素子により高出力の短波長光が得られるため、その実用効果は大きい。また、高屈折率層により電界分布の制御が可能となり、導波層を伝搬するモードプロファイルの制御性が向上する。これによって第 2 高調波出力の放射パターンのアスペクト比を 1 に近づけることが可能となり、光の利用効率が大幅に向上するため、その実用効果は大きい。この光発生装置は、例えば光ピックアップに好適である。

【 0 1 3 7 】さらに、導波層と高屈折率層の形成に用いる耐イオン交換性マスクを同じものとしてイオン交換することにより、セルフアライメントによって導波層の表面にストライプ状の高屈折率層を形成することができるため、その実用効果は大きい。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 光導波路の断面図(a)と、光導波路内の基本波と S H G 波とのオーバーラップを示す図(b)である。

【図 2】 光導波路の構造と導波モードの電界分布の関係を示す図であり、クラッド層がない場合の電界分布図(a)、高屈折率層が薄い場合の電界分布図(b)、高屈折率層が適当な厚さを有する場合の電界分布図(c)、高屈折率層が厚い場合の電界分布図(d)である。

【図 3】 本発明の短波長光発生装置の構成例を示す断

面図である。

【図 4】 出射ビームの集光スポットの強度分布図であり、T E 0 0 モードの集光スポット強度分布図(a)、T E 1 0 モードの集光スポット強度分布図(b)である。

【図 5】 本発明の光波長変換素子の構成例の斜視図(a)と、この光波長変換素子の要部断面における導波モードの電界分布図(b)である。

【図 6】 光波長変換素子の導波モードを説明する図で、表面にスラブ状の高屈折率層を有する導波層のモード分布図(a)と、表面にストライプ状の高屈折率層を有する導波層のモード分布図(b)である。

【図 7】 本発明の他の光波長変換素子の構成例を示す斜視図である。

【図 8】 光導波路幅と位相整合波長との関係を示す図である。

【図 9】 本発明の光波長変換素子の構成例を示す図で、斜視図(a)および要部断面図(b)である。

【図 1 0】 本発明の光波長変換素子の製造工程を示す図で、基板にパターンを形成する工程(a)、第 1 のプロトン交換工程(b)、アニール工程(c)、第 2 のプロトン交換工程(d)をそれぞれ示す図である。

【図 1 1】 本発明の光導波路の構成例を示す斜視図である。

【図 1 2】 本発明の光情報処理装置の構成例を示す斜視図である。

【図 1 3】 本発明の光波長変換素子の構成例を示す斜視図である。

【図 1 4】 本発明の光波長変換素子の別の構成例を示す要部断面図である。

【図 1 5】 分極反転部を形成するための一対の電極の配置例を示す断面図である。

【図 1 6】 分極反転部を形成するための一対の電極と絶縁膜との位置関係を示す断面図である。

【図 1 7】 分極反転部を形成するための一対の電極と絶縁膜との位置関係を示す断面図である。

【図 1 8】 分極反転部を形成するための一対の電極と絶縁膜との位置関係を示す断面図である。

【図 1 9】 図 1 7 に示した方法により形成された分極反転部を示す断面図である。

【図 2 0】 従来の光波長変換素子の構成を示す図である。

【図 2 1】 図 2 0 の光波長変換素子の要部断面を基本波および高調波の電界分布とともに示す図である。

【図 2 2】 従来の他の光波長変換素子の構成を示す図である。

【符号の説明】

- 6 1 基板
- 6 2 導波層
- 6 3 高屈折率層
- 6 4 基本波

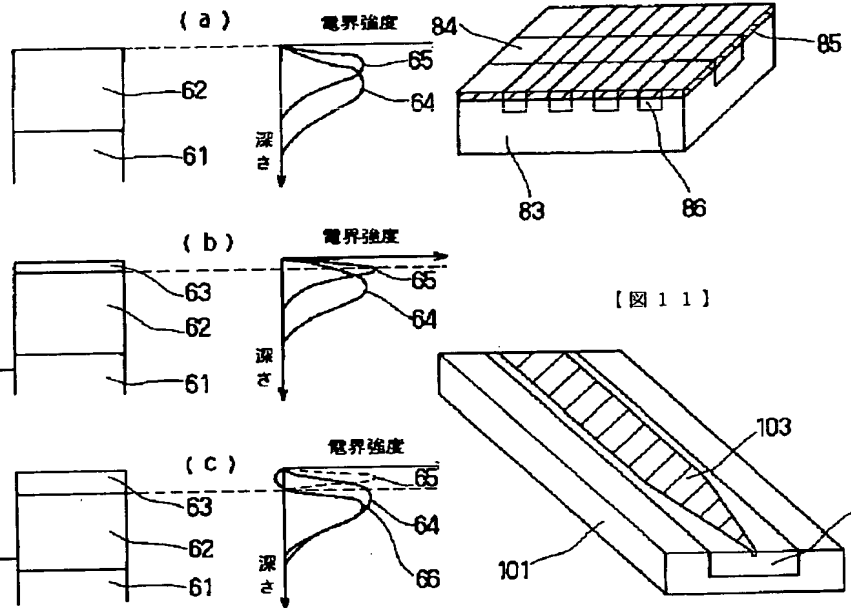
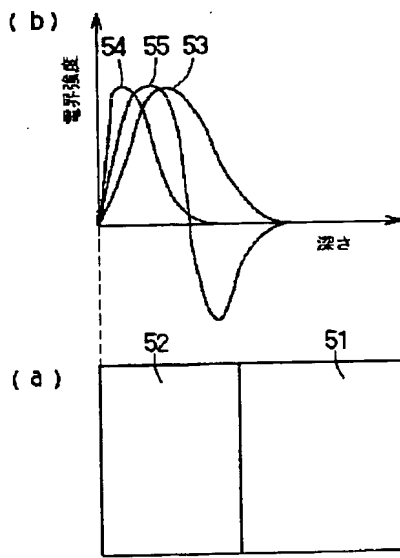
6 5 S H G 波
 7 1 半 導 体 レーザ
 7 2 光 波 長 変 換 素 子
 7 2 a 導 波 層
 7 3, 7 4 レンズ
 7 6 LiNbO_3 基板 (X 板)
 7 7 導 波 層
 7 8 高 屈 折 率 層
 7 9 分 極 反 転 部

9 5 LiNbO_3 基板
 9 6 Ta 膜
 9 7 第 1 の プロトン 交換 部
 9 8 第 2 の プロトン 交換 部
 1 0 5 短 波 長 光 発 生 装 置
 1 0 6 ビーム スプリッタ
 1 0 7 レンズ
 1 0 8 光 ディスク
 1 0 9 デテクタ

【 図 1 】

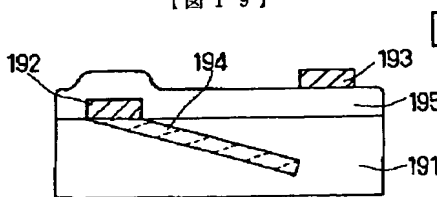
【 図 2 】

【 図 7 】



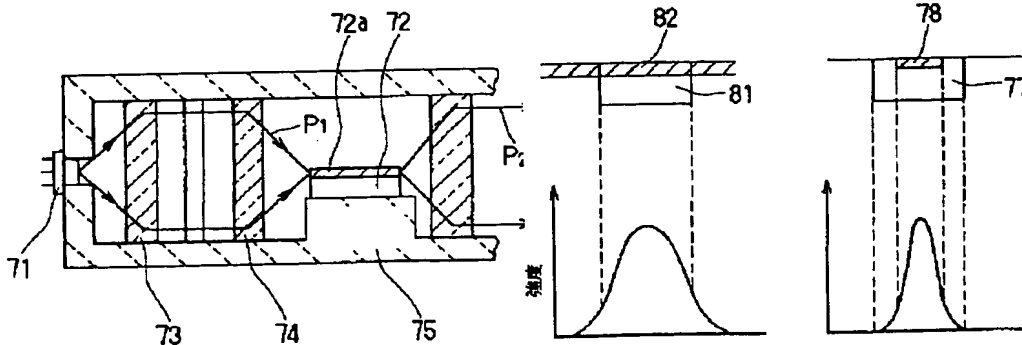
【 図 1 1 】

【 図 1 9 】

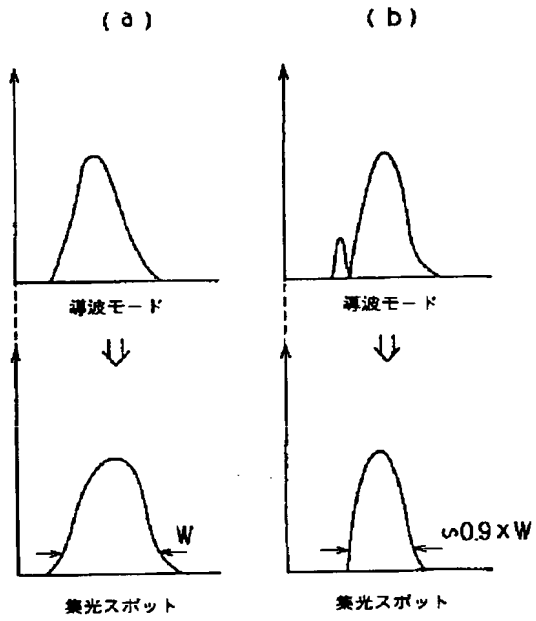


【 図 3 】

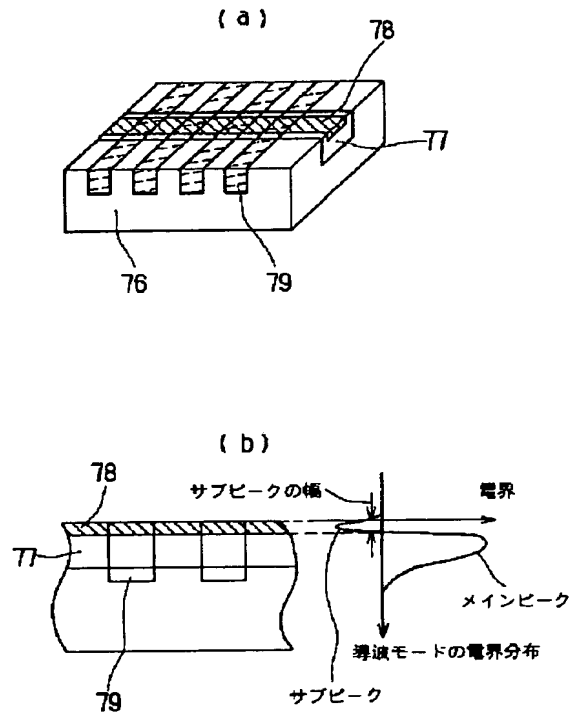
【 図 6 】



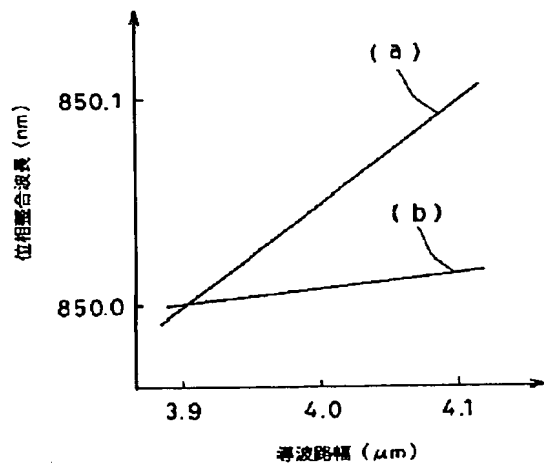
【 図 4 】



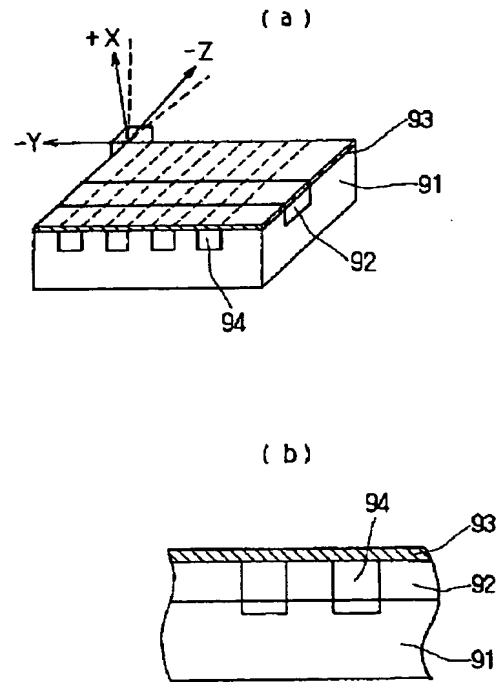
【 図 5 】



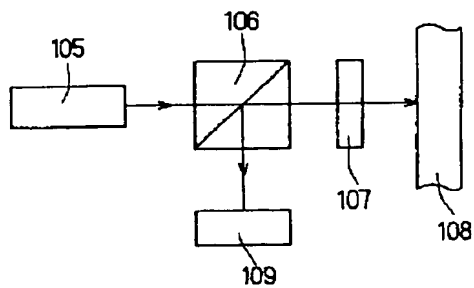
【 図 8 】



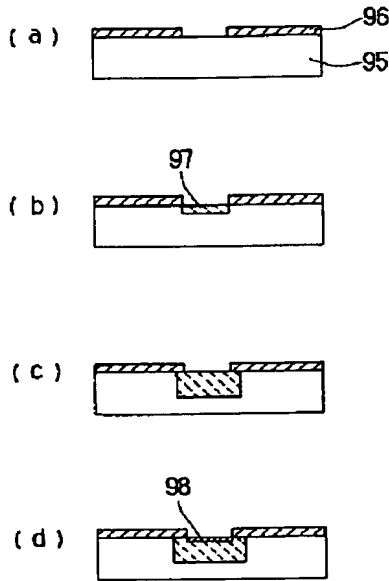
【 図 9 】



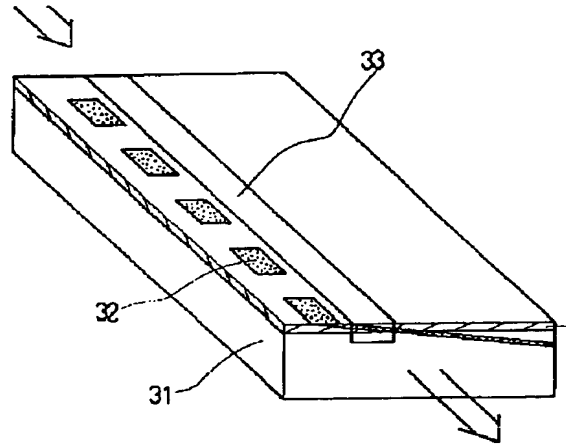
【 図 1 2 】



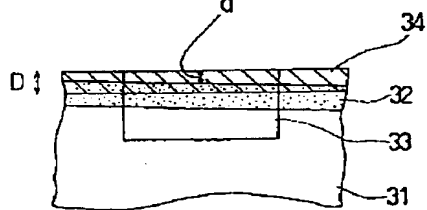
【図 10】



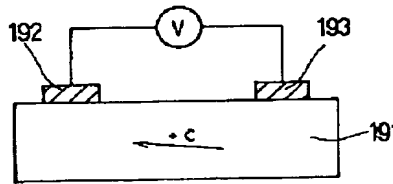
【図 13】



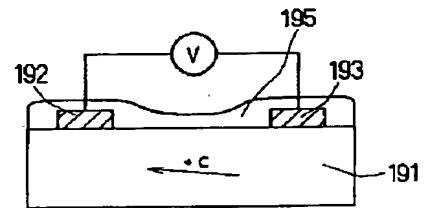
【図 14】



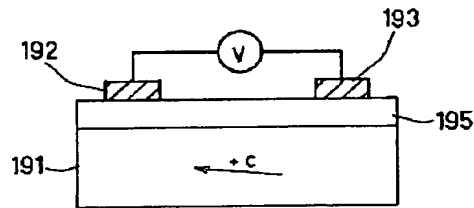
【図 15】



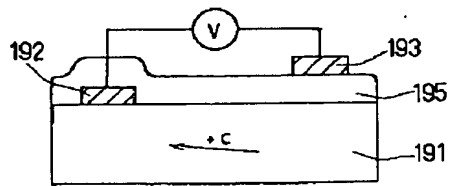
【図 16】



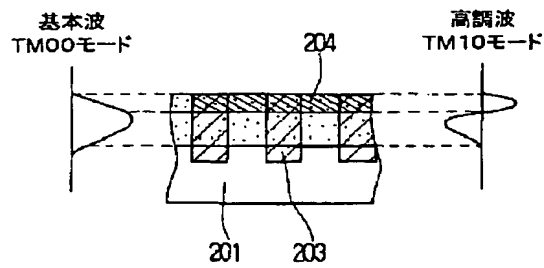
【図 18】



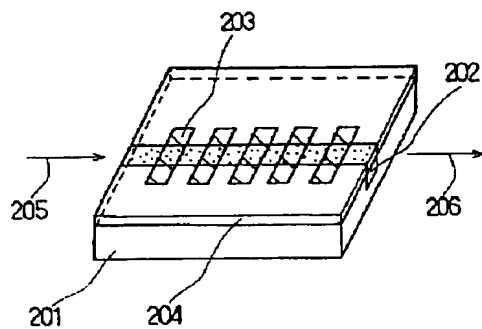
【図 17】



【図 21】



【図 20】



【 図 2 2 】

